

# Zielkonflikte in der Energiewende verstehen durch Mehrzieloptimierung von Energiesystemen

Jonas Finke und Valentin Bertsch

*Die Energiewende hängt an gesellschaftlicher Akzeptanz und dem individuellen Verhalten vieler. Deshalb sollten die vielfältigen Interessen von Entscheidungsträgern und Stakeholdern schon in der Planung von Energiesystemen berücksichtigt werden. Wir zeigen, wie dies mit der Verwendung von Methoden der Mehrzieloptimierung in Energiesystemmodellen gelingen kann.*

Die Energiewende stellt Entscheidungsträger vor Herausforderungen. Von der häuslichen Wärmebereitstellung bis zur kontinentalen Stromversorgung und von konventionellen Kraftwerken über Speicher bis zu erneuerbaren Erzeugungsanlagen stellen sich Fragen nach technischer Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit von Investitionen und Wahrung ökologischer Grenzen. Diese Vielfältigkeit an Energiesystemen und Interessen wird zusätzlich durch starke Verwobenheit der Systemkomponenten, große Unsicherheiten und Beteiligung einer großen Anzahl von Mitmenschen verkompliziert.

Daher werden schon seit Jahrzehnten Energiesystemmodelle genutzt, um solide Entscheidungsgrundlagen zu liefern. Energiesystemmodelle sind abstrahierte Darstellungen von realen Energiesystemen als Gleichungen, die von Computern gelöst oder optimiert werden. Solche Modelle haben in der Regel einen techno-ökonomischen Schwerpunkt, das heißt, sie fokussieren auf technische Systemeigenschaften und Kostenstrukturen.

Der meist vertretene Ansatz ist hierbei, das kostengünstigste System zu ermitteln, das Nachfragen deckt und dabei gewissen technischen Randbedingungen genügt, also z.B. Übertragungs- und Erzeugungskapazitäten nicht überschreitet. Es werden zunehmend auch ökologische Aspekte in Energiesystemmodellen berücksichtigt, wobei diese häufig auf Treibhausgasemissionen beschränkt bleiben. Auf die Einbeziehung von Menschen mit ihren vielfältigen Interessen und Verhaltensweisen wird bisher jedoch häufig verzichtet [1, 2].

## Vielfältige Energiesysteme – vielfältige Interessen

Dabei sind die Interessen, die Stakeholder und Entscheidungsträger an Energiesystemen haben, mindestens so vielfältig wie die Systeme selber und gehen häufig über reine Kostenfragen hinaus. Mangelnde lokale Akzeptanz des Ausbaus von Stromerzeugungs- und Übertragungsinfrastruktur verdeutlicht dies für großskalige Systeme [3]. Auf Haushalts- und regionaler Ebene treiben z.B. Autarkiebestreben die Abkehr von konventionellen Energieträgern oder Komfortempfinden das Heizverhalten.

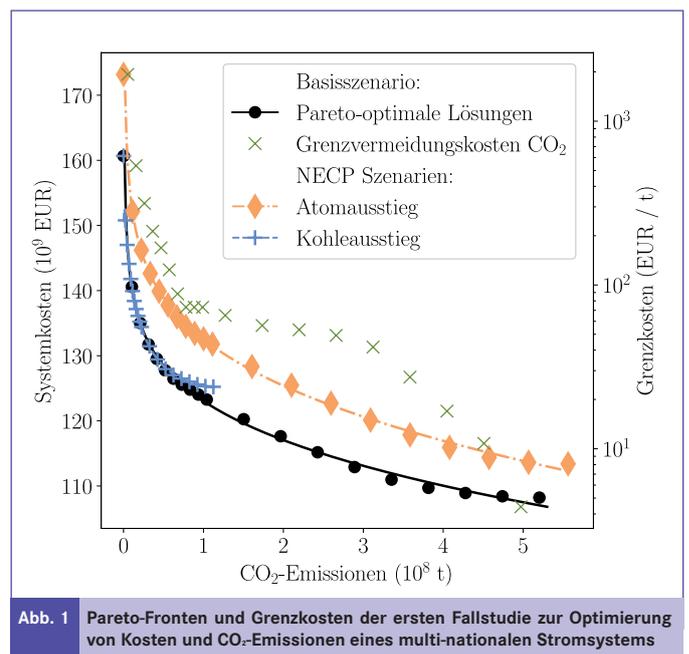
Sollen mehrere solcher Interessen gleichzeitig optimiert werden, dann spricht man von einer Mehrzieloptimierung. Hier ist es nicht mehr eindeutig, welches System das „beste“ ist. Stattdessen sind alle Lösungen *Pareto-optimal*, bei denen Verbesserungen einer

Zielgröße nur möglich sind bei gleichzeitiger Verschlechterung einer anderen Zielgröße.

## Pareto-Fronten als Lösungsmengen

Das Ergebnis einer Mehrzieloptimierung ist dementsprechend nicht eine einzige Lösung, sondern eine Menge von Pareto-optimalen Lösungen, die sog. *Pareto-Front*. Die Berechnung und Analyse solcher Pareto-Fronten sind oft aufwändig. Daher gibt es zwei häufig verwendete Ansätze, um die Bestimmung von Pareto-Fronten zu umgehen und eine – zumindest scheinbar – eindeutige Lösung zu erhalten. Entweder werden Zielgrößen einfach ignoriert oder es werden a priori, z.B. in Form von festen Gewichten oder Grenzwerten, Annahmen über die Präferenzen von Entscheidungsträgern getroffen.

Beide Ansätze haben wesentliche Nachteile gegenüber der Bestimmung von ganzen Pareto-Fronten. Erstens wird der Lösungsraum und damit auch der Spielraum für Entscheidungen nur unvollständig dargestellt. Zweitens ist die so ermittelte Lösung nicht unbedingt Pareto-optimal, das heißt „kosten-freie“ Verbesserungspotenziale bleiben mitunter unentdeckt. Drittens ist die Ermittlung



von Präferenzen extrem unzuverlässig wenn der mögliche Raum für Entscheidungen, konkrete Alternativen und ihre jeweiligen Konsequenzen unbekannt sind [4].

Im Folgenden möchten wir deshalb anhand von zwei stark vereinfachten Fallstudien veranschaulichen, wo hier die Vorteile von Mehrzieloptimierungen liegen, die als Ergebnis eine ganze Pareto-Front zeigen. Die erste Studie entwirft ein multinationales Stromsystem mit minimalen Kosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen, während die zweite Studie ein sektorgekoppeltes häusliches System für Kosten, CO<sub>2</sub>-Emissionen und Wärmekomfort optimiert. Sie nutzen dabei eine äußerst flexible Methodik zur Mehrzieloptimierung von Energiesystemen, die auf verschiedenste Systeme und Zielfunktionen angewendet werden kann und keinesfalls auf die hier gezeigten Beispiele beschränkt ist [5].

### Grenzkosten der CO<sub>2</sub>-Minderung im Stromsektor

Die erste Fallstudie [5] ist eine für Kosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen optimierte Investitions- und Betriebsplanung des Stromsystems von 11 Ländern in Süd- und Westeuropa im Jahr 2050 (siehe Abb. 1). Dargestellt ist eine Teilmenge der Pareto-Front, die den Möglichkeitsraum für verschiedene Kosten und Emissionen aufspannt. Außerdem sind die Grenzvermeidungskosten für CO<sub>2</sub> zwischen je zwei benachbarten Lösungen linear interpoliert aufgeführt.

Diese Grenzvermeidungskosten von z. B. unter 100 €/t bei 90 % Emissionsreduktion sind politisch besonders relevant, weil sie dem CO<sub>2</sub>-Preis entsprechen, der in einem perfekten Markt nötig wäre bzw. sich einstellen würde, um die entsprechenden CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionen zu realisieren. Zusätzlich sind Pareto-Fronten zweier Szenarien für Kohle- und Atomausstiege gemäß der Nationalen Energie- und Klimapläne (NECPs) von 2019 [6] dargestellt. So kann

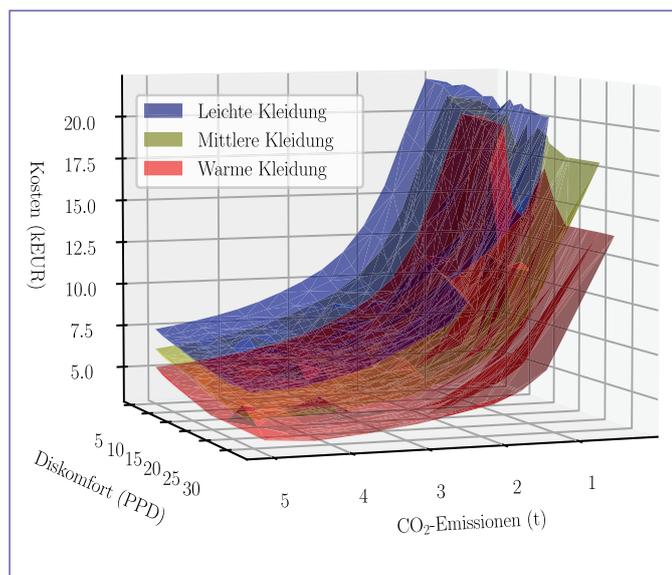


Abb. 2 Pareto-Fronten für verschiedene Kleidungslevel der zweiten Fallstudie zur Optimierung von Kosten, CO<sub>2</sub>-Emissionen und Wärmekomfort eines sektorgekoppelten Gebäudemodells

der Einfluss dieser exogenen Entscheidungen entlang der gesamten Pareto-Fronten analysiert und z.B. gezeigt werden, dass solch ein Kohleausstieg den Möglichkeitsraum um die Alternativen mit hohen Emissionen beschneidet, für niedrige Emissionen aber ineffektiv bleibt, da die Entscheidung gegen Kohle unter diesen Bedingungen ohnehin endogen erfolgt.

### Einbeziehung von Wärmekomfort und Bekleidungsverhalten

Die zweite Fallstudie [7] betrachtet ein sektorgekoppeltes Strom-Wärme-System auf häuslicher Ebene und bezieht Kosten, CO<sub>2</sub>-Emissionen und Wärmekomfort der Bewohner als drei gleichzeitig zu optimierende Zielfunktionen ein. Es wird eine Investitions- und Betriebsplanung mit Photovoltaik, Batterie- und Wasserstoffspeicher sowie Wärmepumpe und Brennwertkessel durchgeführt.

Der Einbezug des Komforts gelingt, indem die Raumtemperatur innerhalb des Gebäudes zu einer modellendogenen Variablen gemacht wird, die durch Betriebsentscheidungen der Heizung erhöht werden kann [8]. Die Raumtemperatur wird dann durch die empirisch fundierte und in Normen [9] verwendete Metrik *Predicted Percentage Dissatisfied* (PPD) in einen Wert für den erwarteten Anteil Menschen übersetzt, die den Zustand als unkomfortabel empfinden würden. Diese Übersetzung wird neben der Raumtemperatur auch durch die Kleidung der Bewohner beeinflusst, die variiert werden kann.

Für die drei Szenarien eines leichten, mittleren und warmen Kleidungslevels ist je eine Pareto-Front zwischen Kosten, CO<sub>2</sub>-Emissionen und durchschnittlichem PPD dargestellt (siehe Abb. 2). So können zwei menschliche Einflussfaktoren untersucht werden, erstens die Inkaufnahme eines niedrigeren Komfortniveaus, um innerhalb einer Pareto-Front Kosten oder Emissionen zu reduzieren und, zweitens, Reduktionen bei gleichbleibendem Komfort durch wärmere Kleidung, also einen Wechsel zwischen den Pareto-Fronten.

Der so aufgezeigte Möglichkeitsraum inklusive der potenziellen Auswirkungen menschlichen Verhaltens kann nun als Basis für Entscheidungen und Handlungsempfehlungen dienen. Vor dem Hintergrund der aktuellen Diskussion um Senkungen von Energieverbräuchen und Raumtemperaturen ist hierbei besonders relevant, dass deutliche Energie-, Kosten und Emissionseinsparungen durch wärmere Kleidung auch ohne Verringerung des Komforts erzielt werden können.

Zur näheren Quantifizierung können die Pareto-Fronten mit einer vertikalen Ebene von links nach rechts, also für ein festes Komfortlevel, geschnitten werden. Daraus resultiert je Kleidungslevel eine Teilmenge der Pareto-Front in 2D (ähnlich zu den Szenarien in Abb. 1). Die horizontalen und vertikalen Abstände zwischen diesen entsprechen dann den Einsparpotenzialen von Emissionen und Kosten- bei gleichbleibendem Komfort durch Kleidungsanpassung.

Neben den beiden hier gezeigten Fallbeispielen erstrecken sich die Anwendungsgebiete für die Mehrzieloptimierung von Energiesystemen über verschiedenste Umweltwirkungen, gesellschaftliche

Akzeptanz, Autarkie oder ungedeckte Nachfragen als Zielgrößen. Auch die Nutzung von Pareto-Fronten in interaktivem Austausch mit Entscheidungsträgern ist ein vielversprechender Ansatz, um zu einem Gelingen der Energiewende beizutragen.

## Literatur

- [1] Pfenninger S, Hawkes A und Keirstead J: Energy systems modeling for twenty-first century energy challenges. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 2014, 33, 74–86.
- [2] Hucklebrink D und Bertsch V: Integrating behavioural aspects in energy system modelling – A review. In: Energies 2021, 14, 4579.
- [3] Bertsch V, Hall M, Weinhardt C und Fichtner W: Public acceptance and preferences related to renewable energy and grid expansion policy: Empirical insights for Germany. In: Energy 2016, 114, 465–477.
- [4] Eisenführ F, Weber M und Langer T: Rational decision making. Springer, Berlin und London 2010.
- [5] Finke J und Bertsch V: Implementing a highly adaptable method for the multi-objective optimisation of energy systems. In: Applied Energy 2023, 332, 120521.
- [6] European Commission: National energy and climate plans (NECPs): Final NECPs. 2019, URL: [https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/national-energy-climate-plans\\_en](https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/national-energy-climate-plans_en) [abgerufen am 7. September 2021]

- [7] Hucklebrink D, Finke J und Bertsch V: Environmental and economic impacts of integrating thermal comfort and clothing levels in residential energy system models. Work in progress.
- [8] Hucklebrink D und Bertsch V: Decarbonising the residential heating sector: A techno-economic assessment of selected technologies. In: Energy 2022, 257, 124605.
- [9] ISO 7730:2005: Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, 2005.

*J. Finke, Wissenschaftlicher Mitarbeiter, V. Bertsch, Professor für Energiesysteme und Energiewirtschaft, Ruhr-Universität Bochum*  
[jonas.finke@rub.de](mailto:jonas.finke@rub.de)

### Hinweis

Zur besseren Lesbarkeit wird in der „et“ das generische Maskulinum verwendet. Die verwendeten Personenbezeichnungen beziehen sich auf alle Geschlechter.

NEWS | MAGAZINE | JOBS | MARKTPARTNER | TERMINE

The image shows a tablet displaying the energy.de website. The navigation bar includes 'ew', 'netzpraxis', 'et', 'HEAT & POWER', 'StE', and 'SW&W'. The main content area features a job portal with the following menu items: 'Jobbörse der Energiewirtschaft', 'Für Fach- und Führungskräfte', 'Jobs finden', and 'Stellenanzeigen veröffentlichen'. A large graphic with the word 'KARRIERE' and an upward-pointing arrow is visible. A red banner at the bottom right of the tablet says 'Aktuell und spartenübergreifend'. Below the tablet, the text 'Das Portal der Energiewirtschaft' and the 'energie.de' logo are displayed.